

漏洩磁界低減機能を持つEV走行中非接触給電システムの構築に関する検討

著者	安部 拓馬, 大場 捷平, 佐藤 文博, 宮原 敏, 松木 英敏, 佐々木 秀
雑誌名	東北学院大学工学部研究報告
巻	54
号	1
ページ	13-20
発行年	2020-02
URL	http://id.nii.ac.jp/1204/00024152/

研究論文

漏洩磁界低減機能を持つEV走行中非接触給電システムの構築に関する検討

Contactless power supply system for electric vehicle driving with magnetic field leakage reduction function

安部 拓馬*
Takuma ABE

大場 捷平*
Syohei OBA

佐藤 文博*
Fumihito SATO

宮原 敏* 松本 英敏** 佐々木 秀***
Satoshi MIYAHARA Hidetoshi MATSUKI Syu SASAKI

Abstract: The European policy of converting all conventional vehicles to electric vehicles (EVs) by the year 2040 is now becoming global. However, to promote and realize this policy, several issues must be addressed. Some of the major drawbacks include the issue of cruising distance being dependent on the battery capacity and the issue of charging time associated with conventional power supply systems. In this study, a contactless power supply system is proposed for EV driving as a solution to address these issues. The proposed system addresses the issues of cruising distance and charging time by supplying electricity during both stoppage and driving. In this study, a configuration comprising eight booster coils was designed for addressing the issue of magnetic field leakage that occurs in contactless power supply systems during EV driving. A small model of the eight booster coils was developed, and the model's validity was verified. Furthermore, by employing the developed scale model, magnetic field leakage of the proposed system was compared with that of existing systems for demonstrating its usefulness.

Keywords: EV, Wireless, 8 figure coil, LC booster

1 研究背景

近年、省エネルギー問題の解決策としてEV(電気自動車)が急速に発展しつつある。欧州等における2040年までの全自動車EV化という方針により、世界中でEVシフトが波及したが、未だ一般に浸透しているとは言い難い。それは、EVにはいくつかの課題が残されているためである。

EV普及への課題は、大きく分けて2つある。1つは、バッテリーに関する課題で、もう1つは給電システムに関する種々の事項である。

バッテリーの課題としては、現行バッテリーでは長距離移動に必要な大電力の蓄電は可能であるが、必然的に物理的容量が大きくなり、重量の増加により電費が悪化してしまっていることが挙げられる。その解決策として、バッテリー交換方式という方式が提案されているが、現存する自動車すべてのEV化はバッテリーの原材料が不足するという懸念も議論されているとの報道もあり現実的な対策とは言い難い。

一方給電システムの課題としては、充電時間の長大化というものが挙げられ、バッテリー容量とのトレードオフは根本的問題である。そのため、充電に関する利便性を向上させる方策として、停車中非接触給電[1]という方式が提案されている。これは、駐車場等に送電システムを設置し、近年市場への導入が始まっている[2]非接触給電システムを

* 東北学院大学

** 東北大学

*** 光電子株式会社

用いて駐車中に給電することで給電時間や手間の問題の解決を図るというものである。しかしながら、充電時間の長さを解決するには至らず、安全性と利便性向上への寄与が第一となり、システム導入への利点については議論が進んでいる。

これらの課題を一挙に解決するシステムとして、走行中非接触給電システムを提案されている。このシステムは、車体底部に取り付けた受電コイルが、送電コイルが埋め込まれた路面の給電レーン上部を通過することで走行しながら給電と充電をすることができるというものである。非接触給電システムを用いることでプラグ接続の制限から解放されることによる位置的な自由度を利用することができる。また必要最低限の給電と充電を行うことにより長距離走行が可能となる。この走行中給電実現の鍵は、インフラとして実装される場合、システム周囲の漏洩磁界低減をどの様にして行うかという具体的な提案が重要となる。

2 研究概要

2.1 走行中非接触給電システムの想定

走行中非接触給電のイメージを Fig. 1 に示す。本検討では、電磁誘導方式[3][4]による非接触給電を検討する。

走行中非接触給電システムを提案する上で、2章2節及び3節に記す2つの条件について想定する必要がある。

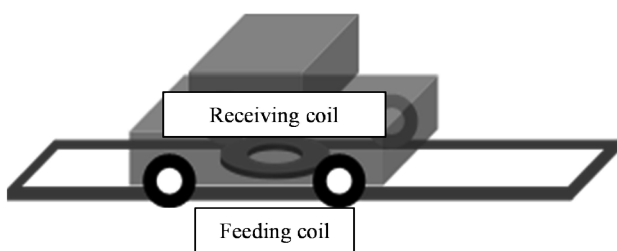


Fig. 1. Contactless power supply diagram while driving

2.2 急速充電方式

1 つ目の条件は、走行中に電費以上の電力を供給するというものである。これを急速充電方式と呼称する。この方式は、給電レーン上を走行している限り、見かけのバッテリーの消費がないため、走行し続けることが可能なものである。この条件では、常に安定した給電を必要とするため、送電コイルの長さは道路の長さと同くなるという想定であ

る。この条件において必要な送電電力は、走行する車輛の実電費が明らかになっている場合であれば算出することができる。この場合の給電イメージを Fig. 2. に示す。例として、実電費 5.8km/kWh である日産 Leaf e+を想定した場合、走行速度は日本における高速道路の法定下限速度である 50km/h と設定すれば、約 11kW の電力を受電することでこの方式が成り立つ。

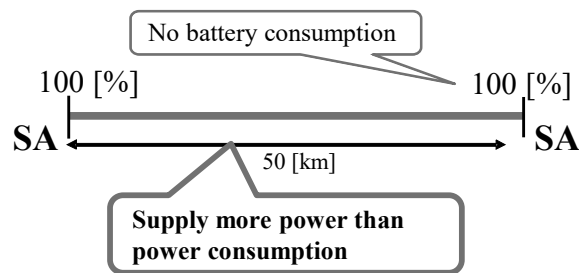


Fig. 2. Endless drive method schematic

2.3 緊急充電方式

2 つ目の条件は、サービスエリアやレストエリアなどの間を最低限走行できるだけの電力を供給するものである。これを緊急充電方式と呼称する。この方式は、ハイウェイなどでのバッテリー切れを防ぎ、走行におけるリスクを軽減するというものである。この方式においては送電コイルを道路全域に設置する必要がないため、コストや埋設工事の時間を大幅に抑えることが可能である。このことから、走行中非接触給電システムの実装を考慮した場合はこちらの方式によるシステム構築が有効である。この方式の具体的な例を以下に述べる。

現状では、走行中非接触給電システムにおける出力電力の規定は定められていない。そのため、停車中非接触給電にて定められている 3.3kW を想定する。また、前項と同様に、日産 Leaf e+への給電と仮定し、現実的なインフラを構築する。

高速道路のサービスエリア間の距離は日本においては 50km であるため、送電コイルも 50km に亘って埋設することを仮定する。

日産 Leaf では、残り航続距離が 30km の時点で警告のアラームが鳴る。ここでは、高速道路のサービスエリアを出発した際にこのアラームが鳴ったという想定で、サービスエリア間 50km を制限速度の下限である時速 50km/h で走行した場合、次のサービスエリアには残りバッテリー残量 0.02% でたどり着くことができる。しかし、この想定では 50km もの送電コイルを埋設しなければならないため、現実的なシステムとは言い難い。

次に、送電コイルを次のサービスエリアまでの残り 20 km に亘って埋設すると仮定する。

時速 50km/h で走行した場合、給電レーンからの充電のみで残り 20km を走行しなければならない。電費から計算すると、8.62kW の電力伝送が必要となる。仮定した停車中非接触給電の規格である 3.3kW を大きく超えてしまうが、送電コイル長は 20km であるため、より現実的なシステムであるといえる。この図を Fig. 3. に示す。

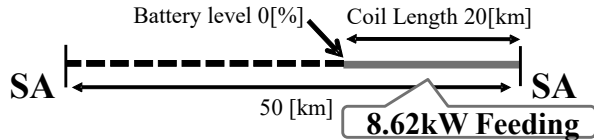


Fig. 3. Safety drive method schematic

2.4 ノイズ低減ブースターコイルの提案

現在、走行中非接触給電システムは各研究機関にて検討されており[5][6]、送受電コイルの形状や、空間磁界のパターンには様々なものがある。先行研究[7]において、走行中の安定した給電に主眼を置いた形状が検討されている。この形状は、送電コイルは矩形の 1 ターンのコイルであり、受電コイルはスパイラル形状となっている。他研究機関にて検討されているスパイラル形状の送電コイルと比較して、矩形 1 ターンにすることで少ない線材でシステムを構築することができるため、より実装に向いた形状といえる。また、左右の幅を受電コイルよりも広くすることで車体の左右の位置ずれに対応することができる。この構成において、走行中における給電は既の実証されている。

しかしながら、上記のコイル形状では、周囲に対する漏洩磁界の影響が懸念される[8][9]。また、今後の自動運転技術の向上を考慮した場合、コイル構成を最適化する必要がある。更に、受電コイルをスパイラル形状とした場合、インダクタンス値が大きくなるため、この構成における最適負荷の値と、実際に用いられるバッテリーの負荷の値にミスマッチが生じている。そのため、既存のコイル構成を改良し、上記の課題を解決するコイル構成としてノイズ低減ブースターコイル構成を提案する。ノイズ低減ブースターコイルの構成図を Fig. 4. に示す。この構成は、受電コイルの下部に同形状のブースターコイルを取り付けたものである。これらの受電部を受電ユニットとする。これは漏洩磁界を低減するノイズ低減コイル[10][11]と、最適負荷を調整す

ることができる LC ブースター方式[12]を組み合わせた送受電コイル構成である。

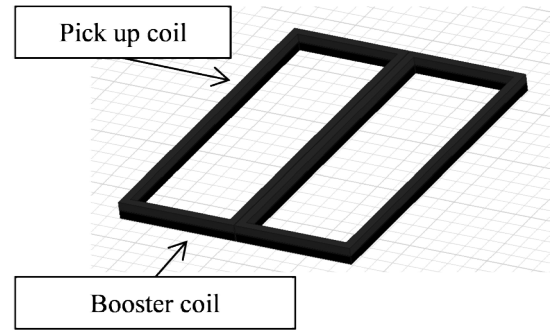


Fig. 4. Noise cancelling booster coil diagram

2.5 ノイズ低減コイル概要

ノイズ低減コイルは、1 本の導線を 8 の字状に設置し、中心部を同位相、両端を逆位相の磁界を発生させることで近傍界では磁界を強め合い、遠方界では磁界が打ち消し合って漏洩磁界を低減させるものである。これにより、漏洩磁界の低減を図る。8 字コイル構成を用いた送電コイルにおける磁束密度分布概略図を Fig. 5. に示す。受電ユニットにおいても同様の磁束密度分布となる。左右の円は導線の手前に流れる電流、中心部の 2 つの円は導線の奥に流れる電流を表しており、実線部は強め合う磁界、破線部は弱め合う磁界を表している。また、給電時を想定した送受電コイルを対向させた場合の磁束密度分布のシミュレーション図を Fig. 6. に示す。この図は Fig. 5. と同一方向から送受電システム全体を見たものである。この図におけるシリンダー状の三角錐が磁束密度の強さを示しており、近傍界では三角錐が大きく、システムから遠ざかるにつれて三角錐が小さくなっているため、Fig. 5. に示した効果が表れている。

更にこの 8 字形コイルに同形状のブースターコイルを組み合わせる特徴的なコイル構成となっている。これをノイズ低減ブースター方式と呼ぶ。

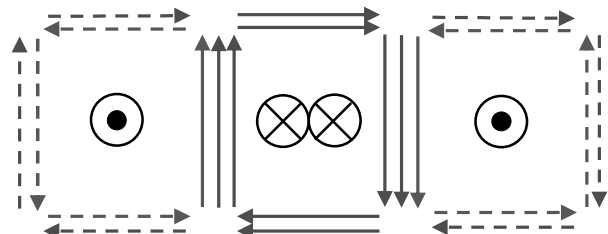


Fig. 5. Magnetic flux density distribution schematic at 8 figure coil

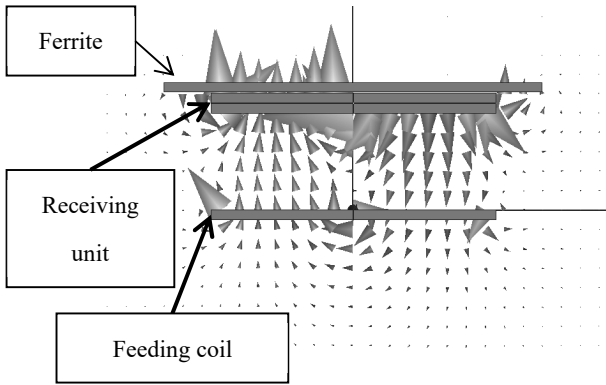


Fig. 6. Magnetic flux density distribution simulation in 8 figure coil

2.6 ブースターコイルにおける最適負荷

コイルにおける最適負荷は、作成されたコイルのインダクタンスと内部抵抗、使用周波数によってのみ決定される。LC ブースター方式は、受電コイルとほぼ同じ形状のコイルを追加することで高い Q 値となるブースター回路と、負荷との整合を図るピックアップ回路で構成される。この構成により、回路全体の最適負荷の値を実際のバッテリーの負荷の値に合わせこむことができる。LC ブースター回路の等価回路を Fig. 7. に示す。LC ブースター回路の最適負荷 R_0 とその効率 η は以下の(1)、(2)式で求められる。

$$R_0 = r_3 \sqrt{1 + \beta + Q_{L3}^2 + \frac{1 + \beta}{1 + \alpha} \beta} \quad (1)$$

$$\alpha \equiv k_{12}^2 Q_{L1} Q_{L2}, \quad \beta \equiv k_{23}^2 Q_{L2} Q_{L3}, \quad Q_{L1} = \frac{\omega L_1}{r_1},$$

$$Q_{L2} = \frac{\omega L_2}{r_2}, \quad Q_{L3} = \frac{\omega L_3}{r_3}$$

$$\eta = \frac{\alpha \beta}{\beta + (1 + \alpha)(\beta + 2(1 + \sqrt{1 + \beta + Q_{L3}^2 + \frac{1 + \beta}{1 + \alpha} \beta}))} \quad (2)$$

式中の Q はそれぞれのコイルのインダクタンス L 、内部抵抗 r 、角周波数 ω で求められるコイルの性能指標である。

また、 α は送電コイルのインダクタンス、ブースターコイルのインダクタンスとそれらの結合係数により求められるコイル間の性能指標であり、 β においてもブースターコイルと受電コイルにおけるコイル間の性能指標である。

このように、LC ブースター方式ではブースターコイルとピックアップコイルを調整することにより、従来よりも幅広い負荷に対して整合を取ることが可能である。LC ブースター方式による負荷特性のグラフを Fig. 8. に示す。このグラフから、最適負荷が数 Ω 程度であることを確認できる。

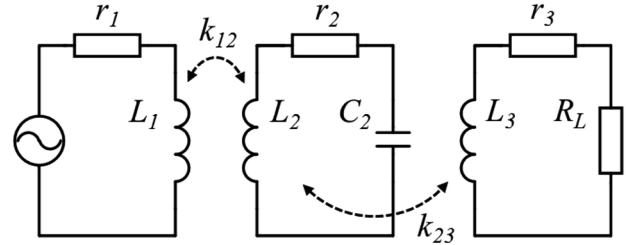


Fig. 7. LC booster equivalent circuit

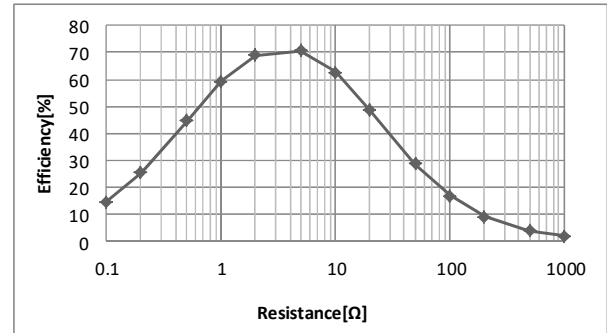


Fig. 8. Load characteristic chart

3 実験方法

3.1 実験概要

実規模サイズの給電コイルの作成は、そのサイズや電力の大きさから困難である。また、シミュレーションにおいてもモデルが大きいほどより多くの時間がかかる。小型スケールモデルの元モデルとの互換性を確認することができれば、今後の研究においてもコストや時間を大幅にカットすることができ、容易に実験を行うことができる。そのため、まずは小型スケールモデルを作成し、シミュレーションによる給電特性や各パラメータと比較、検討することでその妥当性を明らかにした。シミュレーションは、「Maxwell3D®」を用いた電磁界シミュレーション、「Spice®」による回路シミュレーションを行った。Spice によるシミュレーションにおける負荷の設定は、各モデルでの式(1)より求められる最適負荷の値を使用した。現在、受電コイルがスパイラル形状である非接触給電システムについては既にスケールモデルの構築が確立されているためノイズ低減コイルにおける小型スケールモデル構築の検討

を行った。次に、ノイズ低減コイルとスパイラルコイルの小型スケールモデルによる漏洩磁界を比較した。ノイズ低減コイル構成の小型スケールモデルでの漏洩磁界低減を確認することで、インフラ実装時においてもノイズ低減コイルを用いた構成の有用性を示すことを目的とする。

3.2 漏洩磁界指針

ICNIRP のガイドラインによれば、公衆曝露における磁界の基準は本実験にて用いる 100kHz 帯で $27\mu\text{T}$ までと定められている。

本研究は、EV 走行中において、3.3kW の給電を目標としている。そこで、3.3 節にて説明する実規模モデルのノイズ低減コイルと、比較用のスパイラルコイルを用いて 3.3kW における磁界のシミュレーションを行った。ノイズ低減コイルの電流値は送電コイルが 592A、受電コイルが 17A、ブースターコイルが 41A であった。スパイラルコイルは送電コイルが 360A、受電コイルが 221A であった。そのシミュレーション結果を Fig.9. , Fig. 10. に示す。これらの図では、色の濃度を $27\mu\text{T}$ の区切りとしているため、受電コイル付近にて基準以上の磁界が発生していることがわかる。また、この図は Fig. 5. と同一の方向から見たものである。

これらの図から、スパイラル形状では車体側への漏洩磁界が大きくなっていることがわかる。一方、ノイズ低減コイルでは車体側への漏洩磁界を大きく低減しているため、よりインフラ実装に適しているといえる。

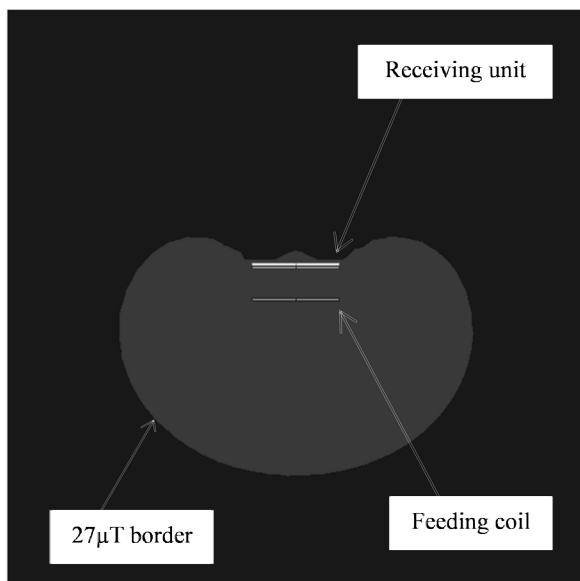


Fig. 9. Leakage magnetic field in spiral coil

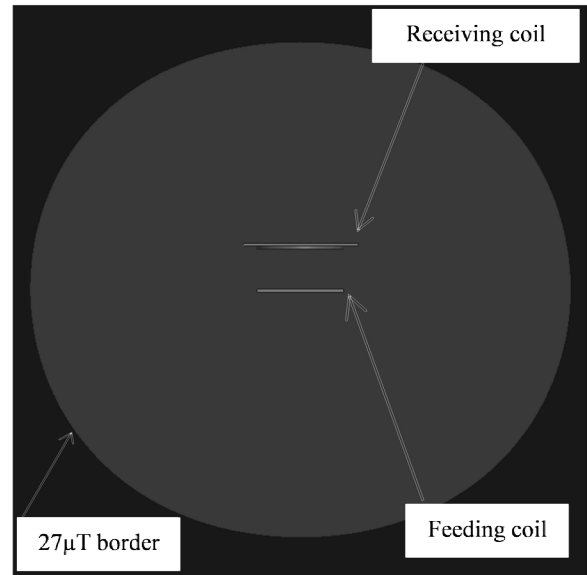


Fig. 10. Leakage magnetic field in 8 figure coil

3.3 コイルサイズ

実装を想定した実規模モデルは、送電コイルはコイル長 20 m、幅 15 cm のノイズ低減コイルであり、受電コイルは縦 4 cm、幅 15 cm の 4 回巻ノイズ低減コイルで構築されたブースターコイル、その 1 回巻で構築されたピックアップコイルで構成される。現在所持している、実装を前提として構築された停車中非接触給電用受電コイルは幅 30 cm のものであるため、車底部への装着を想定して実規模モデルの受電コイル幅も 30 cm とした。送電コイル幅については、自動運転技術の進歩を考慮し、位置ずれを考慮せず受電コイル幅と同一である 30 cm とした。受電コイルの縦方向は送電コイルとの結合やインダクタンスを考慮して 40 cm とした。コイル間ギャップについては、一般的な自動車の車底部が約 15 cm 程度であるため 15 cm と設定した。今回作成した小型スケールモデルは、片側のコイル幅をそれぞれ 3 cm、4 cm、5 cm とし、コイルの横幅の全長を 6 cm、8 cm、10 cm としたため、全体的なサイズは実規模と比較してそれぞれ 1/5、1/3.75、1/3 スケールとなる。実規模の送受電コイルサイズの概要を Fig. 11. に示す。また、1/5 スケールの概要を Fig. 12. に示す。他スケールについても、1/5 スケールと同様にすべてのサイズが縮小されたものである。

実際に作成したノイズ低減コイルとシミュレーションにて作成したノイズ低減コイルの給電結果を比較し、スケールモデル構築の検討を行った。

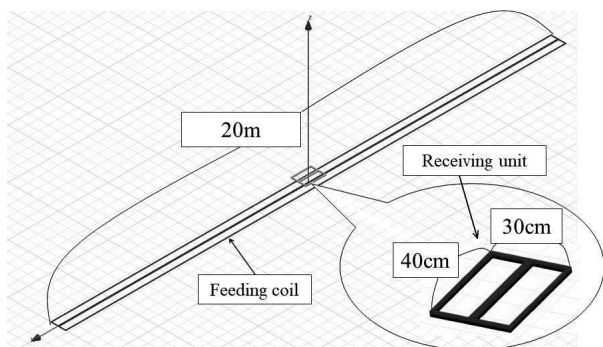


Fig. 11. Full scale system schematic

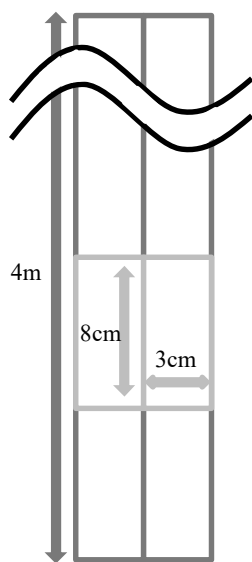


Fig. 12. 1/5 scale model overview

3.4 比較項目

上記の小型スケールモデルと比較するスパイラルコイルは、1/3.75 スケールのサイズと同一サイズで作成した。そのため送電コイルはコイル長 5.33m, コイル幅 8 cm で 1 ターンの矩形コイルで、受電コイルは半径 4 cm のスパイラル形状のものを作成した。漏洩磁界は送電コイルの横端から 10 cm ごとに 70 cm までを測定した。漏洩磁界の比較条件として、出力電力を一定とした比較と起磁力を一定とした比較を行った。出力一定での比較を行うことで、異なる電流における漏洩磁界の低減を確認する。また、起磁力を一定とし、同一電流時における漏洩磁界を比較することで各条件でのノイズ低減コイルによる漏洩磁界低減効果を確認する。

4 実験結果

4.1 スケールモデルの妥当性の確認

1/5, 1/3.75, 1/3 スケールそれぞれの給電結果とシミュレーション結果を Table 1~3. に示す。各

Table の(a)に実測値, (b)にシミュレーションにおける値を示す。ここでは、入力電流 I_{in} , 入力電力 P_{in} , 出力電流 I_{out} , 出力電力 P_{out} , 効率 η を記載する。

Table 1. (a) Result of feeding on 1/5 scale

$I_{in}[A]$	$P_{in}[W]$	$I_{out}[A]$	$P_{out}[W]$	$\eta[\%]$
4.58	8.21	0.99	1.00	12.18
6.52	15.50	1.42	2.00	12.90

Table 1. (b) Simulation results on 1/5 scale

$I_{in}[A]$	$P_{in}[W]$	$I_{out}[A]$	$P_{out}[W]$	$\eta[\%]$
4.61	8.21	0.99	1.00	12.18
6.54	15.90	1.42	2.00	12.58

1/5 スケールでは、効率が悪く、低い出力での測定となったため、1~2W での給電とした。シミュレーションにおいても実測と同様の結果を得ることができた。

Table 2. (a) Result of feeding on 1/3.75 scale

$I_{in}[A]$	$P_{in}[W]$	$I_{out}[A]$	$P_{out}[W]$	$\eta[\%]$
2.17	7.80	0.91	5.00	64.10
3.07	15.50	1.29	10.00	64.52
3.77	23.4	1.58	15.00	64.10

Table 2. (b) Simulation results on 1/3.75 scale

$I_{in}[A]$	$P_{in}[W]$	$I_{out}[A]$	$P_{out}[W]$	$\eta[\%]$
2.16	7.69	0.91	4.94	64.24
3.05	15.41	1.29	10.00	64.89
3.77	23.36	1.58	15.12	64.73

1/3.75 スケールでは、5W, 10W, 15W におけるパラメータの測定を行った。シミュレーションと実測において双方共にほぼ同等の結果を得ることができた。

Table 3. (a) Result of feeding on 1/3 scale

$I_{in}[A]$	$P_{in}[W]$	$I_{out}[A]$	$P_{out}[W]$	$\eta[\%]$
1.47	6.67	0.91	5.00	74.96
2.07	13.22	1.29	10.00	75.64
2.55	19.94	1.58	15.00	75.23

Table 3. (b) Simulation results on 1/3 scale

lin[A]	Pin[W]	Iout[A]	Pout[W]	η [%]
1.37	6.17	0.93	5.18	84.02
1.94	12.32	1.20	9.42	76.47
2.4	18.72	1.6	14.40	76.92

1/3 スケールにおいても, 5W, 10W, 15W におけるパラメータの測定を行った. この結果についても, シミュレーションと実測値がほぼ同等の値であるという結果が得られた.

1/5 スケールにおいて効率が著しく下がってしまう現象については, スケールが小さくなるにつれてコイルの開口面も縮小してしまい, 各コイル両端にて磁界を打ち消してしまうことから発生すると思われる. (2)式より, インダクタンス L , 内部抵抗 r , 結合係数 k の影響が示唆されている. これは, 磁界の打ち消しがそれらの影響を招いていると思われる. 各モデルにおける開口部面積比とインダクタンス, 内部抵抗, 結合係数のグラフを Fig. 13. , Fig. 14. , Fig. 15. に示す. これらの図から, 開口部面積が一定以上小さくなった場合, インダクタンスや内部抵抗, 結合係数が大きく減少していることがわかる. しかしながら, 実車スケールにおけるコイル構成では, 開口部面積が打ち消しの影響を受けるほど小さくすることはないため, この構築への影響はないと言える. スケールモデルの作成については, シミュレーションにて給電状況を確認することで妥当なモデルを作成することができる.

以上の結果から, 各スケールの実測値とシミュレーションにおける値はほぼ差がなく, その妥当性を認めることができた. このことから, シミュレーションと小型スケールモデルを併用することで実車スケールの検討が可能であるといえる.

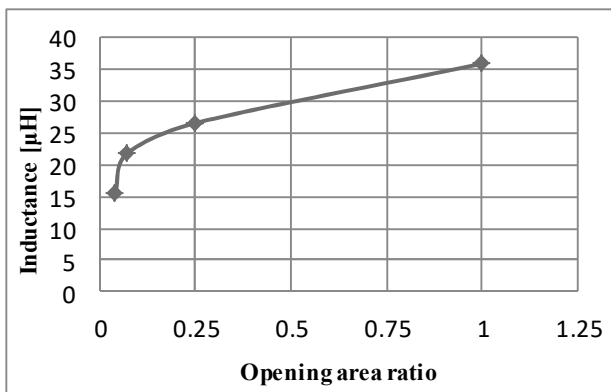


Fig. 13. Graph of opening area and inductance

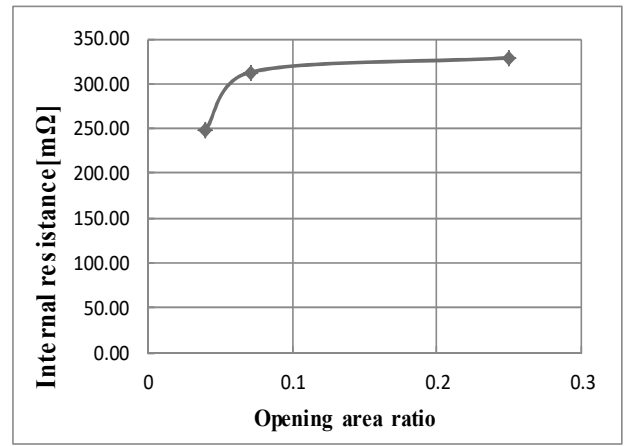


Fig. 14. Graph of opening area and internal resistance

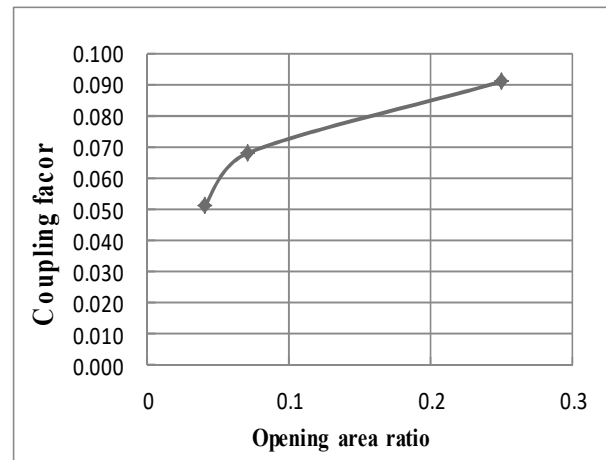


Fig. 15. Graph of opening area and Coupling factor

4.2 漏洩磁界の比較結果

出力電力を一定とした 8 字コイルとスパイラルコイルの漏洩磁界の実測における比較結果を Fig. 16. に示す. また, 起磁力を一定とした漏洩磁界の実測における比較結果を Fig. 17. に示す. これらは 1/3.75 スケールとそのサイズに準じた送電矩形形状, 受電スパイラル形状のコイルを用いて測定した. それぞれの横軸は送電コイルの端からシステム外への水平距離を示す.

漏洩磁界の比較から, 特にコイル付近での漏洩磁界の低減を確認することができた. また, 起磁力一定での比較においても 8 字コイルの漏洩磁界が少ないことを確認した.

これにより, 走行中非接触給電システムにおいて今回提案するコイルが従来のものよりも漏洩磁界を低減することができる構成であることを実測で示した. インフラ実装時においても, 漏洩磁界の低減効果が期待できる.

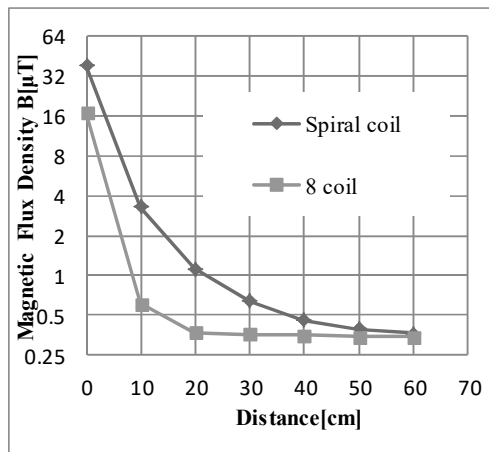


Fig. 16. Leakage magnetic field comparison diagram with constant output power

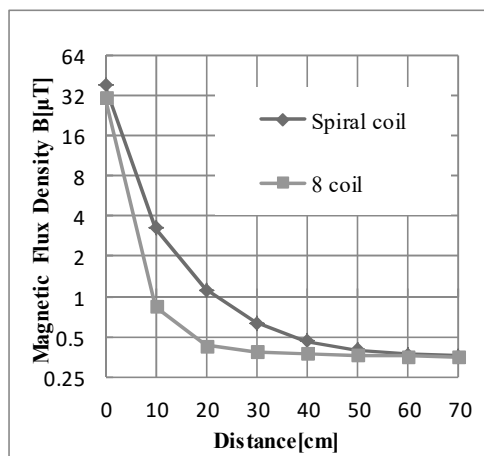


Fig. 17. Leakage magnetic field comparison figure with constant magnetomotive force

5 まとめ

走行中非接触給電システムにおける漏洩磁界低減のため、LC ブースターを搭載したノイズ低減コイルの小型スケールモデルを作成し、シミュレーションと比較することでその妥当性を示した。またその際、サイズを縮小していくと開口部の面積もそれに伴って縮小するため、磁束が打ち消し合ってしまう給電効率が著しく低下することを確認した。これについて、今後はスケールモデル作成の際はシミュレーションによって磁界の打ち消しが作用しないサイズの確認を行う必要があることがわかった。

また、作成した小型スケールモデルを使用し、従来のスパイラル形状の給電システムと漏洩磁界を比較し、ノイズ低減コイルが実際に漏洩磁界を低減していることを確認した。これにより、インフラ実装時の構成においてノイズ低減コイルでの漏洩磁界低減が有効であるといえる。今後の研究にお

いては、シミュレーションにて選定したモデルを用いて実際にコイルを作成し、3.3kW の給電を予定している。また、更なる出力電力の増大も順次行っていく予定である。

参考文献

- [1]紙屋, 大聖, 松木 : “電動車両用非接触急速充電システム”, 電気学会誌, 128, pp. 804-807 (2008)
- [2]安倍秀明 : “家電用非接触給電装置”, 電学誌, 128 巻 12 号, pp. 808-811 (2008)
- [3]松崎亨, 松木英敏 : “FES 用経皮的電力伝送コイルの特性改善に関する考察”, 日本応用磁気学会誌, Vol. 18, No. 2, pp.663-666 (1994)
- [4]高橋 : “EV 用磁気ワイヤレス給電技術の動向と最前線”, まぐね, (公社)日本磁気学会, 9, pp. 96-104 (2014)
- [5]小林大太, 居村岳広, 堀洋一 “走行中ワイヤレス給電システムにおけるリアルタイム最大効率制御”, 電学誌 D, Vol.136, No.6, pp. 425-432 (2016)
- [6]宇野 : “飛び石式走行中非接触給電システムの回路解析”, 電気学会全国大会講演論文集 (CD-ROM), Vol. 139, No. 4 (2018)
- [7]三澤崇弘 : “EV 用走行中非接触給電における送電コイルサイズと 給電効率に関する検討”, IEICE technical report, 信学技報 WPT2012-33 (2012)
- [8]“ENGINE REVIEW”, SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS OF JAPAN, Vol. 7, No. 2, p. 3 (2017)
- [9]加藤昌樹 : “磁界共振結合による電気自動車へのワイヤレス給電”, 東京大学博士論文 (2014)
- [10]太田佑貴 : “電磁誘導型非接触電力伝送システムの設計手法に関する研究”, 東北大学博士論文 (2015)
- [11]青木秀太, 他 : “走行中非接触給電における周囲漏洩電磁界低減を目的とした送電側コイル形状に関する検討” IEICE technical report, 信学技報 115(82), pp. 43-48 (2015)
- [12]太田, 田倉, 佐藤, 松木, 佐藤 : “LC ブースタを利用した非接触電力伝送システムにおける負荷電圧安定化”, 平成 24 年度 電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, 2G24(DVD-ROM) (2012)